

**Л. В. Чучкова\*, А. С. Белов, В. С. Васильева**

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

\*l\_chuchkova@bk.ru

Научный руководитель – доц., канд. техн. наук. О. Г. Ленивецова

## ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СЛОЕВ СИСТЕМЫ TiC–TiB–Ti, СФОРМИРОВАННЫХ НА ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОМ ТИТАНЕ МЕТОДОМ ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ

В работе представлены результаты исследований высокопрочных слоев, полученных на титановом сплаве ВТ1-0 методом вневакуумной электронно-лучевой обработки. В результате наплавки были сформированы слои толщиной от 2,6 до 3,4 мм, содержащие кристаллы карбида и борида титана, распределенные в титановой матрице. Повышение концентрации легирующего порошка способствовало увеличению объемной доли упрочняющей фазы, что привело к образованию таких дефектов, как трещины, и нерастворившихся частиц порошка В<sub>4</sub>С. ДюрOMETрические испытания показали, что средний уровень микротвердости легированных слоев повышается до 436–543 HV.

*Ключевые слова:* титан, борид титана, карбид титана, электронно-лучевая обработка, микротвердость.

**L. V. Chuchkova, A. S. Belov, V. S. Vasileva**

## RESEARCH OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH LAYERS OF TiC–TiB–Ti, IS FORMED ON THE COMMERCIALY PURE TITANIUM BY NON-VACUUM ELECTRON BEAM TREATMENT

This work presents the results of studies of high-impact layers formed on titanium alloy base. The layers with a thickness of 2.6...3.4 mm, containing carbide and titanium boride are formed in the result of treatment. Increasing the concentration of alloying powders increases the volume fraction of the hardening phase, which leads to the formation of defects such as cracks and undissolved powder. Hardness tests have shown that the microhardness of alloying layers value increased to 436–543 HV.

*Keywords:* titanium, titanium boride, titanium carbide, electron beam treatment, microhardness.

Титан и его сплавы широко применяются в промышленности благодаря их уникальным свойствам, к которым можно отнести превосходную коррозионную стойкость, высокую удельную прочность,

пластичность и низкую плотность. Однако при работе в паре трения с другими конструкционными материалами титановые сплавы подвержены сильному изнашиванию. Процесс изнашивания сопровождается схватыванием и образованием задиров [1].

Для предотвращения интенсивного износа титана и сплавов на его основе наиболее перспективным методом является поверхностное упрочнение [2; 3]. Данный тип упрочнения способствует повышению уровня твердости и износостойкости в слое толщиной до 3 мм и не приводит к изменению свойств титановой основы. Одним из методов поверхностного упрочнения является вневакуумная электронно-лучевая наплавка. Данная обработка позволяет получать в покрытиях высокопрочные соединения, такие как карбиды, нитриды и бориды, а отсутствие вакуумных камер позволяет формировать легированные слои на крупногабаритных изделиях [4; 5].

В процессе эксперимента была произведена наплавка порошка карбида бора  $B_4C$ , что позволило сформировать в легированном слое частицы борида и карбида титана, обладающие высокой прочностью, износостойкостью и жаростойкостью. В качестве упрочняемого материала применялся титановый сплав ВТ1-0. Размер заготовки составлял  $50 \times 100 \times 12$  мм. Для защиты от атмосферного воздействия были использованы сварочные флюсы  $CaF_2$  и  $LiF$ . Обработка исследуемых заготовок проводилась на ускорителе электронов типа ЭЛВ-6, который располагается в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) и не имеет аналогов в мире.

Было реализовано несколько режимов, в которых изменялась концентрация наплавляемого порошка карбида бора. Для первого образца концентрация карбида бора составила 12 % вес., а для второго – 20 % вес. Остальные параметры оставались неизменными. Ток пучка в процессе обработки составлял 23 мА, скорость перемещения – 10 мм/с, и частота сканирования была равна 50 Гц. Плотность порошковой насыпки составляла  $0,33 \text{ г/см}^3$ .

Структурные исследования, которые проводились с помощью оптического микроскопа, показали, что при наплавке 12 % порошка карбида бора формируется равномерное и бездефектное покрытие толщиной 2,6 мм (рис. 1, а). Наплавка 20 % порошка  $B_4C$  способствует увеличению толщины легированного слоя до 3,4 мм и приводит к образованию трещин (рис. 1, б) и сохранению нерастворившихся частиц (рис. 1, в). С учетом зарождения трещин в основном вблизи зоны термического влияния можно предположить, что причиной их возникновения являются растягивающие напряжения, возникающие в процессе ускоренной кристаллизации. Также причиной образования трещин может являться высокая объемная доля хрупких частиц борида и карбида титана (около 40 %) в сравнении с первым образцом (27 %). После

обработки в структуре образца, полученного при наплавке 20 %  $B_4C$ , в кристаллах TiB наблюдаются внутренние дефекты в виде трещин (рис. 1,  $\varepsilon$ ).

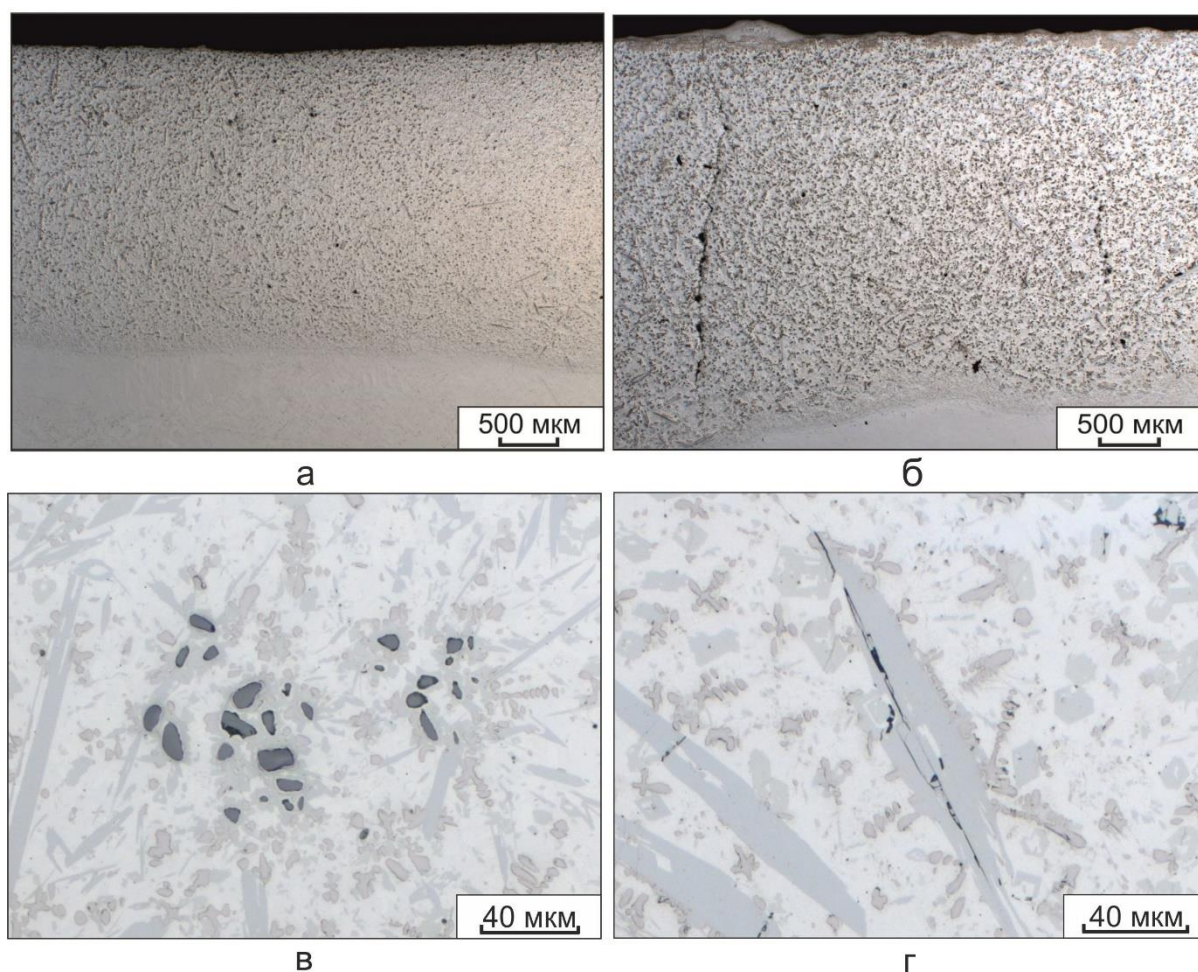


Рис. 1. Структура легированных слоев титана, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки 12 % карбида бора ( $a$ ); и 20 % карбида бора ( $b$ – $\varepsilon$ )

Методами рентгенофазового анализа было зафиксировано наличие фаз TiB, TiC и  $\alpha$ -титана ( $\alpha'$ -Ti). Кристаллы моноборида титана имеют форму пустотелых гексагональных призм, полость которых заполнена титаном (рис. 2,  $a$ ). Карбид титана формируется в виде дендритов на стенках TiB, образуя общий скелет (рис. 2,  $b$ ,  $\varepsilon$ ). TiC также кристаллизуется в виде отдельных частиц округлой и дендритной морфологии. Помимо зафиксированных фаз, в легированных слоях присутствуют дисперсные эвтектические выделения, которые формируются в виде тонких полых игл. Титановая матрица, представленная на рис. 2, имеет типичную структуру закаленного сплава, которая кристаллизуется в виде пластин  $\alpha'$ -фазы.



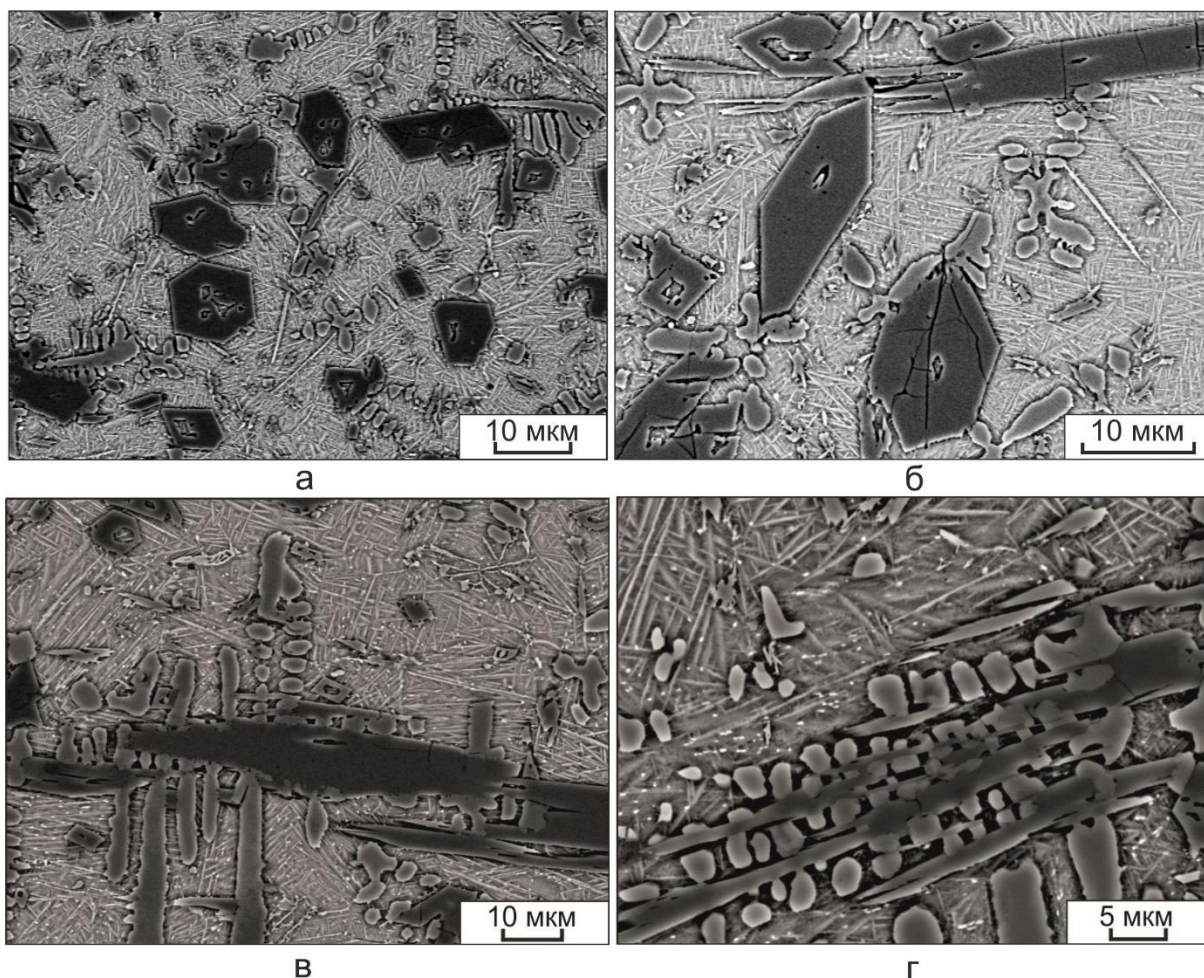


Рис. 2. Микроструктура легированных слоев, полученная с использованием растрового электронного микроскопа:  
*а, б* – микроструктура борида титана; *в, г* – сформированные кристаллы карбида титана на стенках борида титана

Анализ распределения уровня микротвердости по глубине легированных слоев показал, что средний уровень микротвердости составил 436 и 543 *HV* для образца, полученного при наплавке 12 и 20 % карбида бора соответственно. Благодаря повышению концентрации на 8 % при вневакуумной электронно-лучевой наплавке, объемная доля упрочняющих частиц в полученном покрытии увеличилась, что привело к повышению среднего значения микротвердости.

В заключение можно сказать, что проведенная обработка высококонтентрированным электронным лучом в атмосфере позволяет получить на поверхности титанового сплава ВТ1-0 высокопрочные слои толщиной до 3,4 мм. Сформированные в покрытиях упрочняющие частицы карбида и моноборида титана способствуют повышению среднего уровня микротвердости до 436–543 *HV*. Снижение концентрации наплавляемого порошка карбида бора до 12 % позволяет сформировать бездефектные покрытия толщиной 2,6 мм и лишь незначительно уступает второму образцу по показателям микротвердости.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-60066 мол\_а\_дк.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Miller P. D., Holladay J. W. Friction and wear properties of titanium // Wear, 1958. Vol. 2. P. 133–140.
2. Получение износостойких покрытий на титановых сплавах методом вневакуумной электронно-лучевой обработки / О. Г. Ленивцева [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. № 3. С. 103–109.
3. Cheol Oh J., Choo D.–K., Lee S. Microstructural modification and hardness improvement of titanium–base surface–alloyed materials fabricated by high–energy electron beam irradiation // Surface and Coatings Technology, 2000. Vol. 127. P. 76–85.
4. Structure and properties of titanium surface layers after electron beam alloying with powder mixtures containing carbon / O.G. Lenivtseva [et al.] // Applied Surface Science, 2015. Vol. 355. P. 320–326.
5. Improvement of hardness and wear resistance in SiC/Ti–6Al–4V surface composites fabricated by high–energy electron beam irradiation / J.C. Oh [et al.] // Materials Science and Engineering: A. 2003. Vol. 351. P. 98–108.